



Actes des journées coton du Cirad

Montpellier, du 17 au 21 juillet 2000

**Programme Coton
Cirad-ca**



De la modélisation 3D du bilan hydrique du cotonnier à la simulation de la température des feuilles. Application au suivi de l'état hydrique des plantes par thermographies infrarouge

Delphine LUQUET

Cirad, Maison de la télédétection, 500 Rue J.F. Breton, 34093 Montpellier cedex 5

Jean DAUZAT

Cirad, Unité de Modélisation des Plantes, Campus International de Baillarguet, Montferrier-sur-Lez, B.P. 5035, 34032 Montpellier Cedex 01

Pascal CLOUVEL

Cirad-ca, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 5

Agnès BEGUE

Cirad, Maison de la télédétection, 500 Rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5

Alain VIDAL

IPTRID, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy

Problématique

Le cotonnier est la cinquième culture en termes d'importance économique au niveau mondial. C'est une plante pérenne tropicale cultivée annuellement, sa production n'étant intéressante que lors de sa première année de fructification. Du fait de son grand intérêt industriel et économique, cette culture s'est étendue aux climats tropicaux secs, exigeant alors une irrigation conséquente. Sous ces climats semi-arides, il est impératif d'optimiser son irrigation dans une optique de développement durable. Cette volonté forte d'économiser la ressource en eau s'intègre dans le contexte plus général de l'agriculture de précision (PCM, Precision Crop Management). Né aux Etats-Unis il y a quelques années, ce concept s'applique aussi aux PVD où la nécessité environnementale et économique de mieux gérer les apports en eau semble déterminante pour le développement. De tels objectifs de recherche agronomique demandent de comprendre et prédire la réponse écophysologique de la plante à des conditions hydriques données. C'est pourquoi de nombreux modèles de bilan hydrique de la plante et de la culture ont été élaborés.

Par ailleurs, depuis plus de 20 ans, l'information InfraRouge Thermique (IRT), délivrée par télédétection satellitale, aéroportée ou par radiothermométrie et thermographie de terrain, est largement utilisée comme indicateur de l'état hydrique d'une culture. En effet, lorsqu'une culture subit un stress hydrique, elle va diminuer, voire stopper sa transpiration par l'intermédiaire de la fermeture des stomates, de manière à préserver l'eau qui lui reste. Cela va induire une augmentation de la température de ses organes et notamment des feuilles, site privilégié de la transpiration. Ainsi, la température apparaît comme un signal physique directement relié à la réponse biologique de la plante. Toutefois, ces approches expérimentales présentent certaines limites, notamment celle de ne pas différencier l'effet du sol nu dans le signal thermique mesuré, et de ne pas estimer la transpiration de la végétation indépendamment de l'évaporation provenant du sol nu.

En effet, ces indicateurs, au même titre que la plupart des modèles de bilan hydrique de la végétation existants, ne considèrent pas la variabilité structurale et fonctionnelle au sein du couvert et de l'individu plante. Ainsi, la variabilité thermique que l'on peut observer à l'échelle de la parcelle, mais plus originellement du plant et le l'organe, ne peut être prise en compte et expliquée par de telles approches. Or, il semble indispensable de mieux connaître les mécanismes écophysiologiques à la source de l'imagerie thermique pour pouvoir aller plus loin dans l'interprétation et l'utilisation de cette information.

L'objet de ce travail consiste donc à mieux maîtriser l'utilisation de l'IRT par l'amélioration ou, tout au moins, la meilleure maîtrise d'indicateurs. Cela devient possible en si l'on s'affranchit des problèmes de variabilités structurelles et thermiques au sein du peuplement en intégrant l'architecture des plantes dans la modélisation du bilan hydrique.

Pour cela, nous avons choisi d'utiliser le modèle élaboré par Dauzat (Dauzat et al., In press), dans lequel le bilan hydrique est calculé à l'échelle de l'organe élémentaire, et plus particulièrement la feuille.

Une expérimentation a été conduite entre juin et septembre 1999 à Montpellier (Lavalette) sur une parcelle de 3000m² de cotonnier (*Gossypium hirsutum*, DES 111) en vue de valider le modèle dans son application au cotonnier et tester cette approche. Une fois le contexte scientifique expliqué, cette communication vise à présenter les modèles utilisés, ainsi que l'expérimentation ayant permis leur validation. Cela met en évidence la pertinence d'une telle approche dans l'interprétation du signal IRT d'une culture de cotonnier en termes d'état hydrique, quelle que soit l'hétérogénéité structurale de la surface considérée.

L'infrarouge thermique comme indicateur de l'état hydrique de la culture

Depuis plus de 20 ans, l'information IRT (InfraRouge Thermique) est largement utilisée comme indicateur de l'état hydrique d'une culture. Une des approches les plus connues est le CWSI (Crop Water Stress Index, Jackson et al., 1981), basée sur le rapport entre la différence de température feuille-air et le VPD (Vapor Pressure Deficit). Cette technique a été testée aux Etats-Unis dans le contexte de l'agriculture de précision. Cependant, elle s'est avérée insuffisante une fois appliquée à des végétations non couvrantes, où l'effet du sol nu ne peut être négligé. Elle a donc été améliorée par la méthode du trapèze VIT (Vegetation Index/Temperature, Moran et al., 1994), basée sur la construction d'un trapèze dont les 4 limites correspondent aux conditions expérimentales extrêmes de culture (sol nu sec et saturé, végétation entièrement couvrante bien irriguée ou stressée). Cette approche est basée sur l'interpolation linéaire entre les conditions extrêmes de la culture, supposant que ce trapèze contienne toutes les conditions intermédiaires. L'indice calculé, le WDI (Water Deficit Index), permet d'évaluer l'ETR (Evapotranspiration Réelle) provenant à la fois de la végétation et du sol nu, et, par conséquent, d'étendre l'approche du CWSI à des couverts hétérogènes. L'intérêt du WDI réside dans son calcul à partir de la mesure d'un indice de végétation et d'une température de surface composite. Toutefois, il présente deux limites:

- Tout d'abord, la linéarité à l'intérieur les bornes du trapèze repose sur l'hypothèse qu'il n'y a pas d'échanges de chaleur entre le sol nu et la végétation.
- D'autre part, il est supposé que le stress hydrique n'a pas d'effet instantané sur la structure et le taux de couverture de la végétation.

De plus, le WDI permet d'estimer l'ETR et non la transpiration de la végétation indépendamment de l'évaporation provenant du sol nu.

La modélisation de l'état hydrique de la plante

Comme il a été dit précédemment, les modèles de bilan hydrique de la végétation existants présentent la faiblesse de ne pas considérer l'hétérogénéité structurale et fonctionnelle au sein du couvert et de la plante, et ce au même titre que les indicateurs de stress. réduisant ainsi leur domaines de validité.

Aussi, pour pallier ces faiblesses, il semble intéressant d'adopter une représentation 3D de la plante de manière à modéliser son bilan hydrique en tenant compte de la variabilité structurale et fonctionnelle inter et intra plant. C'est sur ce principe que repose le modèle utilisé ici (Dauzat et al., In press), dans lequel la végétation est décrite et représentée à l'échelle de l'organe, et donc de la feuille, support végétal élémentaire de la modélisation du bilan hydrique. En effet, au sein d'une plante, chaque feuille se différencie par son âge, sa position spatiale et donc son environnement climatique, variable au cours de la journée (rayonnement...). Cela lui confère un état écophysiological propre, notamment en termes de régulation stomatique, et donc de transpiration et température. Ce sont ces températures, spécifiques à chaque feuille, qui constituent l'information délivrée par une image infrarouge thermique ou thermographie d'un couvert végétal. Cela sous-entend que la façon la plus précise d'estimer la transpiration d'un ensemble de plantes serait de considérer le phénomène au niveau de chaque feuille individuelle, constitutive de la plante. Le modèle de Dauzat ayant prouvé sa capacité à simuler précisément les températures et transpirations foliaires (T_f) chez le caféier, il est utilisé ici pour retrouver la transpiration d'une culture de cotonnier, et estimer par ce biais, les erreurs commises dans l'estimation d'indicateurs à partir d'approches telles que le trapèze.

Le modèle 3D de bilan hydrique de la plante de Dauzat

Ce modèle est basé sur la description de plantes (en termes de topologie et géométrie) à l'échelle de l'organe dans des maquettes 3D, pour simuler la transpiration des feuilles, et ce à travers 5 modules principaux :

- Le calcul du bilan radiatif des feuilles dans le PAR (Photosynthetically Active Radiation), NIR (Near InfraRed) et IRT. Les données d'entrée sont le PAR et NIR incidents et le rayonnement atmosphérique sur la canopée. Les sorties sont le rayonnement net de chaque feuille élémentaire.
- Le calcul des transferts turbulents mono dimensionnels dans et au dessus de la végétation. La vitesse du vent (u) est calculée à partir du profil de LAI. Ce module donne en sortie la résistance de couche limite de chaque feuille selon ses dimensions.
- Le calcul du bilan d'énergie des feuilles, en prenant en compte le bilan radiatif et gs. De chaque feuille. Les flux de chaleur latente (LE), sensible (H) ainsi que la température sont calculés.
- Le calcul de gs de chaque feuille ; le modèle stomatique choisi ici est assez empirique (Jarvis, 1976), basé sur la multiplication de fonctions de 4 paramètres: PAR, FTSW (Fraction of Transpirable Soil Water), âge et VPD. La variable « âge » confère au modèle une prise en compte de la variabilité fonctionnelle intra-plante.

Les simulations sont effectuées à pas de temps discrets (de quelques minutes à une heure), le modèle procédant par itération jusqu'à convergence des résultats.

La représentation 3D des plantes est délivrée par le logiciel **AMAPmod**, qui permet de créer et analyser des bases de données de l'architecture des plantes (Godin et al., 1999). Il utilise un langage codé à partir duquel il est possible de construire une représentation interne spécifique de l'architecture des plantes à partir de mesures. Les Plantes peuvent alors être reconstruites graphiquement et visualisées en 3D. Différents types de données peuvent être extraites et analysées avec différents points de vue.

Travail expérimental

Une parcelle de 3000m² de cotonnier (*Gossypium hirsutum*, variété DES111) a été semée le 21 mai 1999 sur le domaine de Lavalette (Montpellier) avec une densité de 6 plants/m². 3 placettes de 12m² ont été délimitées:

- Une placette de "référence" avec des apports en eau non limitants;
- Deux autres placettes dites "stressées" où les apports en eau ont été limités à des stades de développement clé de la culture: l'une au stade floraison (début août) et l'autre au stade cut-out (début septembre).

A ces stades, ces deux sous-parcelles étaient protégées à l'aide d'une serre tunnel lors des éventuels épisodes pluvieux ou d'une irrigation par sprinkler. Ces trois parcelles ont été suivies en continu en termes de croissance et de température durant tout le développement, entre début juin et mi-septembre. D'autre part, à 3 dates données (un stade végétatif mi-juillet, et lors de la limitation des apports en eau) les mesures suivantes ont été effectuées pour les différents traitements hydriques :

- météorologiques (vent, rayonnement net et PAR (Photosynthetically Active Radiation), humidité et température de l'air dans et au dessus du couvert...),
- Etat hydrique du sol (sonde à neutrons jusqu'à 2m de profondeur),
- Croissance (LAI, taux de couverture) et état hydrique des plantes (gs avec un poromètre deltaT et potentiel hydrique foliaire avec une chambre à pression).
- Des mesures thermiques à la surface du sol, au niveau de la feuille individuelle (thermocouples, radiothermomètre Everest), et au niveau de la parcelle par des thermographies (Fig.1) (caméra IRT, modèle 760 IR Imaging Radiometer, spectral Band Pass 8-12µm) acquises dans le plan du soleil avec 11 angles de vue différents, et ce, aux 3 dates considérées à 14 et 16h, en conditions ensoleillées à 3 mètres au dessus du toit de la canopée.
- L'architecture des plantes, grâce à un digitaliseur 3D (3SPACE FASTRAK, Polhemus), permettant d'enregistrer les coordonnées 3D des organes de la plante dans un repère magnétique. Entre 5 et 11 plantes consécutives dans le rang étaient scannées (selon la taille des plants aux 3 stades de développement observés), à la fois sur la parcelle de référence et "stressée".

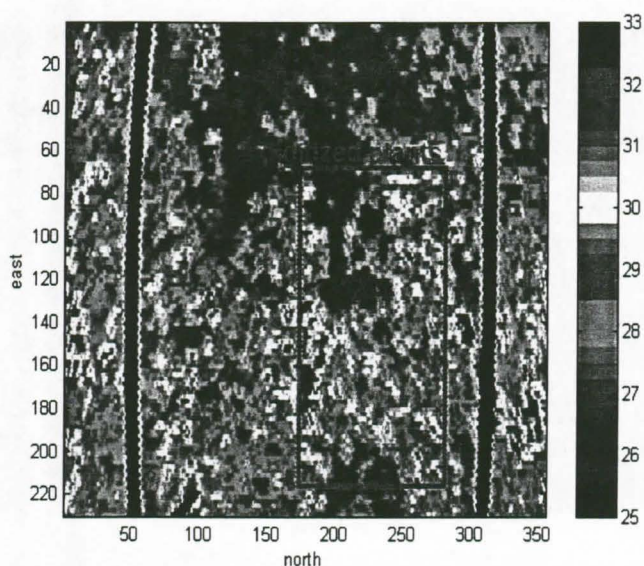


Fig.1: Thermographie de 16m² sur la parcelle témoin au moment du cut out (DOY 250). Angle de vue vertical, au midi solaire. Les niveaux de température sont présentés sur la droite de la figure. La position des plants digitalisés est mise en évidence par le rectangle rouge.

Résultats et validation

La Figure 2 montre une maquette de cotonnier créée par AMAPmod, à partir de l'analyse d'une base de données de digitalisation 3D. La plante, ici dans une représentation dite «fil de fer», a été digitalisée sur la parcelle témoin au moment du cut-out (Fig. 1). Les plants d'une parcelle donnée digitalisés à un même stade avec le même repère spatial ont pu être agencés en maquettes 3D de manière à reconstituer une portion de rang sur la parcelle, visible sur une thermographie.



Fig.2: Maquette 3D d'un cotonnier au stade cut-out sur la parcelle site témoin (DOY 250).

Les maquettes ainsi créées ont permis la validation du modèle de bilan d'énergie. Cette validation a, pour le moment, été réalisée pour le stade «cut-out». Pour cela, des températures simulées et observées au niveau de certaines feuilles ont été comparées. Les observations proviennent soit de mesures à l'aide de thermocouples (évolution journalière de températures foliaires), soit d'images acquises avec la caméra infrarouge thermique.

La Figure 3 est une représentation visuelle de la répartition simulée des températures au cut-out sur un plant situé dans la parcelle de référence. La variabilité de température foliaire rencontrée et par conséquent la variabilité intrinsèque d'une température composite mesurée par télédétection est nettement mise en évidence sur cette figure. Un exemple de résultats de validation est présenté dans la figure 4(a,b).

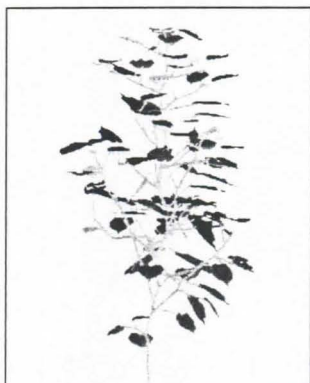
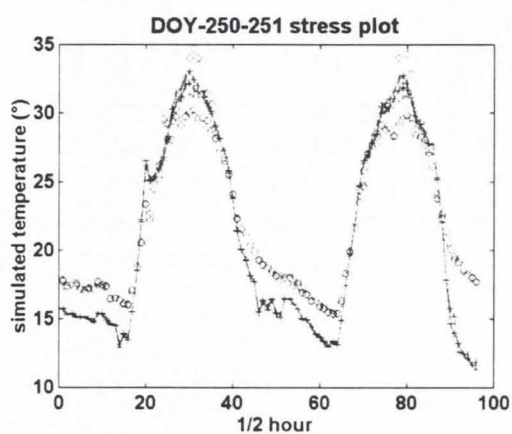
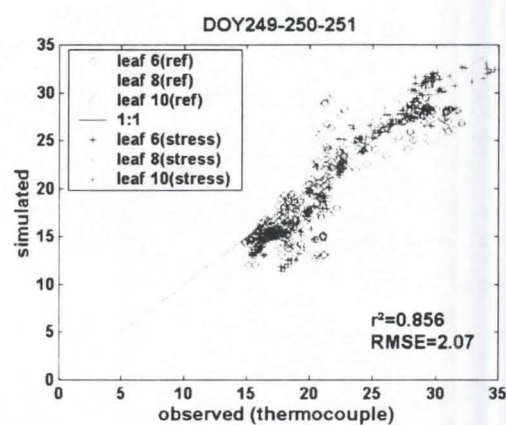


Fig. 3 : Thermographie simulée sur un cotonnier (parcelle témoin, DOY250, midi solaire). Les couleurs correspondent à des températures de 28° et moins (bleu) à 32° et plus (rouge).



(a)



(b)

Fig. 4 : Comparaison des températures foliaires simulées et observées à différents niveaux de la plante. Validation au cut-out sur la parcelle stress en évolution journalière (a) et régression pour les parcelles témoin et stress au cut-out (b).

La figure 5 montre les thermographies simulée et observée d'une portion de rang de cotonnier. On peut voir que les feuilles visibles, constitutives de la température composite de surface, présentent une forte variabilité thermique.

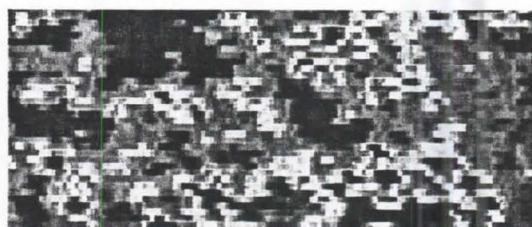
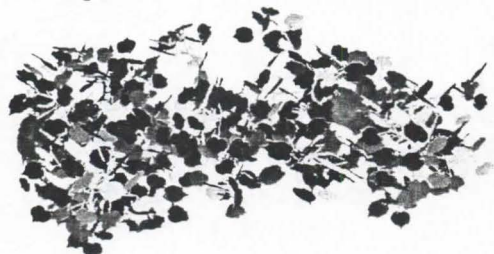


Fig. 5 : Thermographie simulée (a) et observée (b) de 5 plants de cotonniers. Vue verticale au midi solaire. Parcelle témoin. Stade cut out.

Sur la figure 6 sont présentées les gammes de températures simulées et observées pour des feuilles à l'ombre et au soleil. La régression est assez bonne, mais avec une surestimation systématique dans les simulations de 1.72°. ceci serait dû à la valeur d'émissivité choisi dans le traitement des thermographies.

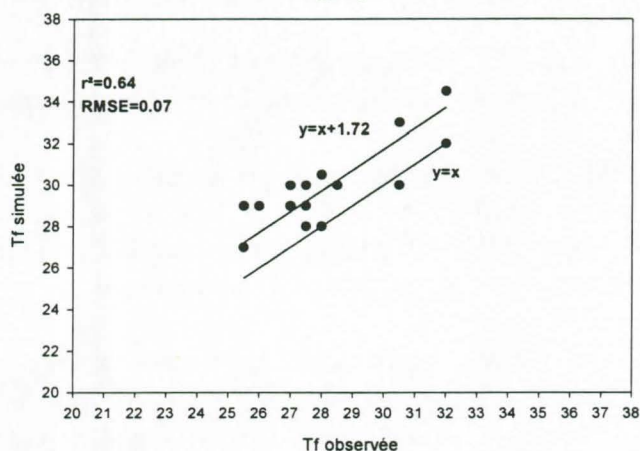


Fig. 6: Comparaison des valeurs extrêmes de températures observées (thermographies) et simulées, pour des feuilles à l'ombre et au soleil. DOY250, midi solaire. Parcelles témoin et stress.

Perspectives et conclusion

Actuellement, la validation n'a été réalisée que pour un seul des trois stades de développement observés: le «cut-out», correspondant à une couverture totale du sol par les feuilles. Aux vues des premiers résultats, le modèle 3D de bilan hydrique de la plante (Dauzat, In press) prouve son intérêt dans la modélisation et l'interprétation de la variabilité de la température au sein du couvert. Il permet de comprendre quelles feuilles de la canopée interviennent dans l'information IRT mesurée par un radiothermomètre ou une caméra IRT, et donc, quelles feuilles au sein du peuplement rendent le mieux compte d'un stress hydrique. De cette manière, il s'avère possible d'interpréter précisément une température composite observée, par la connaissance physique de ses constituants. Toutefois, la validation à cette échelle de travail (aux travers d'histogrammes de répartition des températures sur une thermographie par exemple) n'en est qu'à ses débuts et le jeu de thermographies acquises n'est encore que très peu exploité.

Les mesures effectuées aux stades d'apparition du premier bouton et de la première fleur restent à interpréter. Pour ces stades, la présence de sol nu n'est pas ou insuffisamment prise en compte dans les indicateurs de stress hydriques existants. Les données acquises permettent d'aborder l'étude de l'effet de la température du sol sur les thermographies. Pour ce faire, il est envisagé d'ajouter au modèle un compartiment «sol» assez simple, mais permettant d'approfondir la connaissance des échanges thermiques entre sol nu et végétation, d'une part et sol couvert et végétation d'autre part. On peut espérer que les résultats obtenus permettront d'améliorer l'utilisation de l'information délivrée par les indicateurs de stress existants, ou encore de mieux cerner leurs domaines de validité.

Références

- Dauzat Jean, Rapidel Bruno, Berger A., Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: description of the model and application to a coffee plantation in Costa Rica, *In press*
- Godin Christophe, Costes Evelyne, Caraglio Yves, 1999, Exploration of plants architecture databases with the AMAPmod software illustrated on an apple-tree bybird family, *Agronomie*, n°19(3/4), pp. 164-184
- Jackson R.D., Reginato R.J., Pinter P.J.Jr, 1981, Canopy temperature as a crop water stress indicator, *Water resources researches*, n°17(4), pp1133-1138
- Moran Susan, Clarke T.R., Inoue Y., Vidal Alain, 1994, Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index, *Remote Sensing Environment* n°9, pp246-263
- Lhomme Jean Paul, 1991, The concept of canopy resistance: historical survey and comparison of different approaches, *Agricultural and Forest Meteorology*, n°54, pp. 227-240
- Jarvis P.J., 1976, The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, *Phil. Trans. R. Soc. London*, n°273, pp. 593-610